

## 光源装置及びそれを用いた露光装置

(LIGHT SOURCE DEVICE AND EXPOSURE EQUIPMENT USING THE SAME)

## BACKGROUND OF THE INVENTION

## Field of the Invention

本発明は、ターゲットにレーザビームを照射することにより極端紫外（E U V : extreme ultra violet）光を発生する光源装置に関する。さらに、本発明は、そのような光源装置を用いた露光装置に関する。

## Description of a Related Art

半導体プロセスの微細化に伴って光リソグラフィも微細化が急速に進展しており、次世代においては、100～70nmの微細加工、更には50nm以下の微細加工が要求されるようになる。例えば、50nm以下の微細加工の要求に応えるべく、波長13nm程度のEUV光源と縮小投影反射光学系（cataoptric system）とを組み合わせた露光装置の開発が期待されている。

EUVリソグラフィは光リソグラフィの一種であり、波長10nm領域の極端紫外光を使用し、縮小投影反射光学系において、半導体回路のパターンのマスク像を半導体ウエハ上に塗布されたレジスト上に結像させて回路形成を行う。EUVリソグラフィに用いる露光装置においては、スループットが80枚/時、レジスト感度が5mJ/cm<sup>2</sup>であることが前提とされており、現在考えられている光学系の構成を使用した場合には、10～1000W程度のEUV光源が必要とされる。

EUV光源としては、レーザビームをターゲットに照射することによって生成するプラズマを用いたLPP（laser produced plasma）光源と、放電によって生成するプラズマを用いたDP（discharge plasma）光源と、軌道放射光を用いたSR（synchrotron radiation）光源との3種類がある。これらの内でも、LP

P光源は、プラズマ密度をかなり大きくできるので黒体輻射に近い極めて高い輝度を得られ、ターゲット材料を選択することにより必要な波長帯のみの発光が可能であり、ほぼ等方的な角度分布を持つ点光源であるので光源の周囲に電極等の構造物がなく、 $2\pi$  sterad という極めて大きな捕集立体角の確保が可能であること等の利点から、10～1000W程度のパワーが要求されるEUVリソグラフィ用の光源として有力であると考えられている。

LPP光源において、プラズマを発生させるためにレーザービームを照射するターゲットとして固体材料を用いると、レーザービーム照射領域がプラズマ化するときレーザービームの照射により発生する熱がレーザービーム照射領域の周辺に伝わり、その周辺において固体材料が溶融する。溶融した固体材料は、直径数 $\mu\text{m}$ 以上の粒子隕(デブリ)となって多量に放出され、集光ミラーにダメージを与え、その反射率を低下させる。一方、ターゲットとして気体を用いると、デブリは少なくなるものの、レーザー発振器に供給するパワーからEUV光のパワーへの変換効率が低下してしまう。

ところで、LPP光源は、点光源あるいはその集合体であるため、LPP光源から発散される光を集光ミラーで集めて、EUVリソグラフィに利用可能な光を出力することが必要である。ここで、点光源光の光束伝達においては、エテンデュが常に一定であるという原理が存在する。エテンデュとは、光束の面積と広がり角(立体角)との積で定義される量である。光源側のエテンデュ(光源面積と発散立体角との積)が照明領域のエテンデュ(照明領域の面積と照明光の立体角との積)より大きいと、照明領域に取り込むことのできない光束の割合が増加するので、光源側のエテンデュを照明領域のエテンデュよりも小さく抑える必要がある。EUV光は発散光なので、エテンデュを小さく抑えるためには、光源となるプラズマのサイズを十分に小さくしなければならない。例えば、光源から立体角 $\pi$ の範囲で集光するためには、プラズマの直径を0.5mm程度以下にすることが必要である。

従来、LPP光源においてプラズマを生成するために、1.5W級のLD励起

YAGレーザを用いて開発が行われてきた。このYAGレーザは、パルス継続時間が数nsで、使用されるレーザビームの波長が1 $\mu$ m帯である。一方、数万度を超えるプラズマの生成過程は、ps ( $10^{-12}$ 秒)のスケールで進展する。レーザビームが照射される初期の時点におけるプラズマの密度が小さいと、それ以後においてレーザビームはターゲット中の分子や原子を十分にプラズマ化することができずに素通りしてしまう。逆に、プラズマ密度が大きすぎる場合には、レーザビームが照射される側のプラズマに遮られて、十分な体積のプラズマが生成できなくなる。従って、ターゲットガスの密度には、最適な範囲が存在する。

YAGレーザを用いる場合には、レーザビームを効率良く吸収させるために、レーザビームをかなり密度が大きいターゲットガスと相互作用させる必要がある。そのため、ノズルの噴出口近くの密度の大きいガスにレーザビームを照射することが必要である。しかしながら、高出力化したYAGレーザは、一般に、横モードに多数のモードが存在するため集光性が悪く、また、運転中に発生する熱によって硝子媒質の不均一性が増すため横モードがさらに悪化し、その結果、ターゲットへの照射効率が低下してしまうという問題もあった。

#### SUMMARY OF THE INVENTION

本発明はこのような問題点に鑑みてなされた。本発明の第1の目的は、エテンデュが小さく、高出力を取り出すことができ、デブリによる損傷の少ない光源装置を提供することである。また、本発明の第2の目的は、そのような光源装置を用いることにより、微細な光リソグラフィを実現することができる露光装置を提供することである。

上記課題を解決するため、本発明に係る光源装置は、ターゲットにレーザビームを照射することにより極端紫外光を発生する光源装置であって、ターゲットとなる物質を供給するターゲット供給部と、低次の横モードを有する発振段レーザと発振段レーザにより発生した低次の横モードのレーザビームを増幅する少なくとも1つの増幅段レーザとを含み、増幅されたレーザビームをターゲットに照

射することによりプラズマを発生させるレーザ部と、プラズマから放出される極端紫外光を集光して出射する集光光学系とを具備する。

また、本発明に係る露光装置は、ターゲットにレーザビームを照射することにより極端紫外光を発生する光源装置であって、ターゲットとなる物質を供給するターゲット供給部と、低次の横モードを有する発振段レーザと発振段レーザにより発生した低次の横モードのレーザビームを増幅する少なくとも1つの増幅段レーザとを含み、増幅されたレーザビームをターゲットに照射することによりプラズマを発生させるレーザ部と、プラズマから放出される極端紫外光を集光して出射する集光光学系とを有する光源装置と、該光源装置によって発生された極端紫外光を複数のミラーを用いてマスクに集光する照明光学系と、マスクから反射された極端紫外光を用いて対象物を露光させる投影光学系とを具備する。

以上のように構成した本発明によれば、低次の横モードを有する発振段レーザにより発生した集光性の高いレーザビームを増幅段レーザで増幅してターゲットに照射するため、エテンデュが小さく、高出力を取り出すことができ、デブリによる損傷の少ない光源装置を提供することができる。さらにまた、この光源装置を用いて、微細な光リソグラフィを実現する露光装置を提供することができる。

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

図1は、本発明の一実施形態に係る光源装置の構成を示す断面図であり；

図2は、本発明の一実施形態において使用される駆動用レーザの第1の具体例を示す図であり；

図3は、本発明の一実施形態において使用される駆動用レーザの第2の具体例を示す図であり；

図4は、本発明の一実施形態において使用される駆動用レーザの第3の具体例を示す図であり；

図5は、本発明の一実施形態に係る露光装置の構成を示す図である。

## DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

以下、図面に基いて本発明の実施の形態について説明する。なお、同一の構成要素については同一の参照番号を付して、これらの説明を省略する。

図1に、本発明の一実施形態に係る光源装置の構成を示す。この光源装置は、レーザ部として、レーザビームを発生する駆動用レーザ101と、駆動用レーザ101が発生するレーザビームを集光する光学系とを含んでいる。本実施形態においては、この光学系が、集光レンズ102によって構成されている。集光レンズ102としては、平凸レンズやシリンドリカルレンズが使用される。

また、光源装置は、ターゲット供給部として、レーザビームが照射されるターゲットとなる物質を供給するターゲット供給装置108と、ターゲット供給装置108から供給される物質を噴射するためのノズル103とを含んでいる。レーザ部が、ターゲット供給部から供給されるターゲットにレーザビームを照射することにより、プラズマを生成する。

さらに、光源装置は、プラズマから放出される極端紫外（EUV：extra ultra violet）光を集光して出射する集光光学系を構成する反射鏡105と、レーザビーム照射領域の周辺から放出される直径数 $\mu\text{m}$ 以上の粒子隕（デブリ）を取り除いてEUV光のみを通過させるデブリシールド106とを含んでいる。反射鏡105としては、放物面鏡あるいは球面鏡又は複数の曲率を有する球面鏡を使用することができる。本発明において、EUV光は、 $5\text{nm}\sim 50\text{nm}$ の波長を有している。

本発明においては、ターゲットとして、気体、液体、固体のいずれも使用することができる。ただし、レーザビームが照射される時点において、又はレーザビームが照射された直後においてガス状態である物質が望ましい。具体的には、常温（ $20^{\circ}\text{C}$ ）でガス状態である物質が該当し、例えば、キセノン（Xe）、キセノンを主成分とする混合物、アルゴン（Ar）、クリプトン（Kr）、又は、低気圧状態でガスである水（ $\text{H}_2\text{O}$ ）、アルコールを用いることができる。極端紫外光発生部は真空状態にする必要があるので、常温で水を供給してもノズルから出た

後は気体となる。

ターゲットとなる物質が最初からガス状態である場合には、この気体に圧力を加えてノズル103の開口部から放出することにより、この気体をガス状態のまままで供給しても良い。又は、この気体を、正イオン又は負イオンを核として複数個の原子又は分子が凝集してできる電荷を帯びた原子又は分子の集合体（クラスターイオン）のジェット（噴射）として供給しても良い。

本実施形態においては、ターゲットとしてキセノン（Xe）を用いている。その場合、発生するEUV光は約10nm～約15nmの波長を有する。ターゲット供給装置108がキセノンガスに圧力を加えることにより、ノズル103の開口部から上方に向けてキセノンガスを噴射する。ノズル103は、スリット状の開口を有するか、又は直線上に配列された複数の開口を有する。従って、噴出したキセノンガスは、開口部の長手方向に広い幅を有しながら垂直に流動し、キセノンガスの柱を形成することになる。

駆動用レーザ101から発生されたレーザビームは、シリンドリカル集光レンズ102により集光され、実質的にライン状の断面形状を有するレーザビームとなって、キセノンガスの柱に向けて照射される。照射されるレーザビームがキセノンガスと交差する位置において、数mm～数cmの長さを有する葉巻状のプラズマ104が発生する。

プラズマから放出されたEUV光は、集光光学系を構成する反射鏡105によって集光され、平行光107となる。集光光学系の光軸は、プラズマ104の長手軸と直交させることが望ましい。平行光107は、デブリを除去するために設置されたデブリシールド106を通過した後、露光器に供給される。

駆動用レーザ101は、低次の横モードを有する発振段レーザと、発振段レーザにより発生した低次の横モードのレーザビームを増幅する少なくとも1つの増幅段レーザとを含んでいる。以下に、駆動用レーザ101の具体例について詳しく説明する。

図2に、本実施形態において使用される駆動用レーザの第1の具体例を示す。

第1の具体例においては、発振段のYAGレーザ21と増幅段の3つのYAGレーザ22～24とを直列に接続して、MOPA (master oscillator power amplifier) 方式のレーザとしている。ここではMOPA方式のレーザについて例示するが、インジェクション・ロック方式 (ILS : injection locking System) のレーザとしても良い。MOPA方式とは、増幅段レーザのリア側及びフロント側の両方に反射ミラーを配置しない方式であり、増幅段レーザにおいてはレーザ共振器が構成されない。一方、インジェクション・ロック方式とは、増幅段レーザのリア側及びフロント側の両方に反射ミラーを配置する方式であり、増幅段レーザにおいてもレーザ共振器が構成される。いずれの方式を採用しても、発振段レーザにおいて低次の横モードのレーザビームが放出されれば、増幅段レーザによって増幅されて放出されるレーザビームも低次の横モードを維持することができ、集光性が高くなる。なお、このように駆動用レーザにおいて複数台のレーザ装置を直列に接続する場合には、レーザ媒質が同種のものであることが好ましい。

発振段のYAGレーザ21においては、SBS (誘導ブリルアン散乱) 素子やアダプティブ光学素子等の光学素子を用いて、シングルモードかつ横モードが達成されている。発振段のYAGレーザ21は、波長が1  $\mu$  m近傍のレーザビームを発生する。発振段レーザは低出力で良いため、約10 kHzまでの高い周波数の繰り返し発振やビームモードの安定化を、比較的容易に図ることができる。

一方、増幅段のYAGレーザ22、23、24は、高出力レーザとされている。発振段のYAGレーザ21から増幅段のYAGレーザ22に入射された低出力のパルス光は、高出力YAGレーザ22、23、24内を順々に進行して増幅される。これにより必要なエネルギーが得られ、集光性が高くエネルギーも高いレーザビームが、高出力YAGレーザ24から出力される。

EUV光源の大きさは、エテンデュの制約を満たすことが必要である。それより大きいと、露光に利用できる光束の割合が減少し、効率が低くなってしまいうからである。従って、EUV光源の駆動用レーザとして利用するためには、レーザ

ビームの径が十分に小さくしなければならない。本発明においては、発振段レーザとして、低次の横モードを有するレーザを用いているので、レーザビームの径を十分に小さくすることができる。

図3に、本実施形態において使用される駆動用レーザの第2の具体例を示す。第2の具体例においては、炭酸ガスレーザを3台直列に接続して、MOPA方式のレーザとしている。ここではMOPA方式のレーザについて例示するが、インジェクション・ロック方式のレーザとしても良い。

図3に示すように、出力10WのパルスCO<sub>2</sub>レーザ31を発振段に配置し、増幅段には、2台のCW（連続波）-CO<sub>2</sub>レーザ32、33を配置している。発振段のパルスCO<sub>2</sub>レーザ31は、高い繰り返し周波数（例えば、100kHz）でパルス光を発生することが可能である。この例においては、発振段のパルスCO<sub>2</sub>レーザ31が横モードかつシングルモードで動作し、波長が10μm近傍のレーザビームを発生する。

増幅段のCW-CO<sub>2</sub>レーザ32は、8個の炭酸ガスレーザ1～8を含み、増幅段のCW-CO<sub>2</sub>レーザ33も、8個の炭酸ガスレーザ9～16を含んでいる。図3において、これらの炭酸ガスレーザ内をレーザビームが通過する様子が、矢印で示されている。発振段のパルスCO<sub>2</sub>レーザ31から増幅段のCW-CO<sub>2</sub>レーザ32に入射された低出力のパルス光は、炭酸ガスレーザ1～16内を進行して増幅され、集光性が高くエネルギーも高いレーザビームが、増幅段のCW-CO<sub>2</sub>レーザ33から出力される。本実施形態においては、発振段のパルスCO<sub>2</sub>レーザ31から出射された10Wのレーザビームが、40kWに増幅されて増幅段のCW-CO<sub>2</sub>レーザ33から出射される。

CW-CO<sub>2</sub>レーザは連続発振なので、発振の繰り返し周波数は、発振段レーザの性能に支配される。このことは、例えば、2kHz、4kHz、6kHz等の高い繰り返し周波数でEUV光を出力する場合に有利である。しかしながら、出力されるレーザビームのエネルギー密度を高くすることはできない。なお、増幅段のCW-CO<sub>2</sub>レーザ32、33については、発振段のパルスCO<sub>2</sub>レーザ3



1 と同期をとって変調をかければ、無駄な励起エネルギーを節約してシステム効率を向上させることができる。

図1に示す光源装置において、駆動用レーザとしてCO<sub>2</sub>レーザを用いれば、波長の長いレーザビームを低密度のガス状態ターゲットに照射してEUV光を発生することができる。そのため、ノズル103の開口部からプラズマ104までの距離をかなり長くとることができ、プラズマによるノズルのダメージや加熱の問題を軽減し、デブリの発生を抑圧して反射鏡の寿命を長くすることができる。また、ノズルの開口部とプラズマが発生する位置との間隔を離すことができるので、EUV光を取り出すための集光光学系の配置に関する設計が容易になる。

図4に、本実施形態において使用される駆動用レーザの第3の具体例を示す。第3の具体例においては、第2の具体例における増幅段のCW-CO<sub>2</sub>レーザを、パルス発振レーザであるTEA (transversely excited atmospheric) -CO<sub>2</sub>レーザに置き換えている。TEAレーザは、数気圧に達する圧力の混合ガス内で反転分布と利得を得るために、光軸と交差した電気放電を行い、赤外～紫外と広い波長範囲を有するコヒーレント光源である。

図4に示すように、発振段にパルスCO<sub>2</sub>レーザ41を配置し、増幅段に2台のTEA-CO<sub>2</sub>レーザ42、43を配置している。この場合には、発振の繰り返し周波数がTEA-CO<sub>2</sub>レーザの性能に支配されるため、繰り返し周波数を高くすることは難しいが、出力されるレーザビームのエネルギーのピーク値を高くすることができる。

次に、本発明の一実施形態に係る露光装置について説明する。図5に、本発明の一実施形態に係る露光装置の構成を示す。この露光装置は、以上において説明した光源装置を光源として用いており、光源におけるデブリが少ないため、光学系への悪影響を小さくできる。

図5に示すように、露光装置は、EUV光を発生する光源装置100と、光源装置100によって発生されたEUV光を複数のミラーを用いてレチクルステージ300に取り付けられたレチクル(マスク)に集光する照明光学系200と、

マスクから反射されたEUV光を用いて対象物を露光させる投影光学系401とを含んでいる。投影光学系401は、ウェハを設置するためのウェハステージ402や、ウェハ500の位置を検出するウェハアライメントセンサ403と共に、露光器400を構成している。露光装置の全体は、真空ポンプ等により低圧力に保たれた真空系内に設置されている。

次に、本実施形態に係る露光装置の動作について説明する。

光源装置100は、エテンデュが十分に小さい高エネルギーのEUV光を出力する。従って、露光に利用できる光束の割合が高く、効率が良い。照明光学系200は、光源装置100から出力されたEUV光を、集光ミラー201、202、203によって、レチクルステージ300に集光する。このように、照明光学系200は、全て反射系で構成されており、トータルの反射率は、約0.65となっている。

レチクルステージ300の図中下側には、所望のパターンが形成されたマスクが取り付けられており、このマスクは、形成されたパターンに従って、照明光学系200から入射されたEUV光を反射する。露光器400に設けられた投影光学系401は、マスクによって反射されたEUV光を、ウェハステージ402上のウェハ500に塗布されたレジストに投影して、レジストを露光する。これにより、マスク上のパターンを縮小して、ウェハ上のレジストに転写することができる。レチクルステージ300及びウェハステージ402は、光軸に対して垂直に移動可能であり、レチクルステージ300及びウェハステージ402を移動させることにより、全マスクパターンを露光する。

以上説明したように、本発明によれば、低次の横モードを有する発振段レーザにより発生した集光性の高いレーザビームを増幅段レーザで増幅してターゲットに照射するため、エテンデュが小さく、高出力を取り出すことができ、デブリによる損傷の少ない光源装置を提供することができる。さらにまた、この光源装置を用いて、微細な光リソグラフィを実現する露光装置を提供することができる。

CLAIMS:

1. ターゲットにレーザビームを照射することにより極端紫外光を発生する光源装置であって：

前記ターゲットとなる物質を供給するターゲット供給部と；

低次の横モードを有する発振段レーザと、前記発振段レーザにより発生した低次の横モードのレーザビームを増幅する少なくとも1つの増幅段レーザとを含み、増幅されたレーザビームを前記ターゲットに照射することによりプラズマを発生させるレーザ部と；

前記プラズマから放出される極端紫外光を集光して出射する集光光学系と；  
を具備する光源装置。

2. 前記レーザ部が、レーザ共振器を有しない増幅段レーザを用いるMOP A (master oscillator power amplifier) 方式に従って構成されている、請求項1記載の光源装置。

3. 前記レーザ部が、レーザ共振器を有する増幅段レーザを用いるインジェクション・ロック方式 (I L S : injection locking System) に従って構成されている、請求項1記載の光源装置。

4. 前記発振段レーザ及び前記少なくとも1つの増幅段レーザが、YAGレーザを含む、請求項1記載の光源装置。

5. 前記発振段レーザ及び前記少なくとも1つの増幅段レーザが、YAGレーザを含む、請求項2記載の光源装置。

6. 前記発振段レーザ及び前記少なくとも1つの増幅段レーザが、YAGレーザを含む、請求項3記載の光源装置。

7. 前記発振段レーザが、シングルモード化されたYAGレーザである、請求項4記載の光源装置。

8. 前記少なくとも1つの増幅段レーザが、高出力YAGレーザを含む、請求項4記載の光源装置。

9. 前記少なくとも1つの増幅段レーザが、高出力YAGレーザを含む、請求項

5 記載の光源装置。

1 0. 前記発振段レーザ及び前記少なくとも 1 つの増幅段レーザが、媒質として二酸化炭素ガスを含む混合ガスを使用する炭酸ガスレーザを含む、請求項 1 記載の光源装置。

1 1. 前記発振段レーザ及び前記少なくとも 1 つの増幅段レーザが、媒質として二酸化炭素ガスを含む混合ガスを使用する炭酸ガスレーザを含む、請求項 2 記載の光源装置。

1 2. 前記発振段レーザ及び前記少なくとも 1 つの増幅段レーザが、媒質として二酸化炭素ガスを含む混合ガスを使用する炭酸ガスレーザを含む、請求項 3 記載の光源装置。

1 3. 前記発振段レーザが、パルス炭酸ガスレーザである、請求項 1 0 記載の光源装置。

1 4. 前記少なくとも 1 つの増幅段レーザが、連続波 (CW : continue wave) 炭酸ガスレーザを含む、請求項 1 0 記載の光源装置。

1 5. 前記少なくとも 1 つの増幅段レーザが、連続波 (CW : continue wave) 炭酸ガスレーザを含む、請求項 1 1 記載の光源装置。

1 6. 前記少なくとも 1 つの増幅レーザが、T E A (transversely excited atmospheric) 炭酸ガスレーザを含む、請求項 1 0 記載の光源装置。

1 7. 前記少なくとも 1 つの増幅段レーザが、T E A (transversely excited atmospheric) 炭酸ガスレーザを含む、請求項 1 1 記載の光源装置。

1 8. ターゲットにレーザビームを照射することにより極端紫外光を発生する光源装置であって、前記ターゲットとなる物質を供給するターゲット供給部と、低次の横モードを有する発振段レーザと前記発振段レーザにより発生した低次の横モードのレーザビームを増幅する少なくとも 1 つの増幅段レーザとを含み、増幅されたレーザビームを前記ターゲットに照射することによりプラズマを発生させるレーザ部と、前記プラズマから放出される極端紫外光を集光して出射する集光光学系とを有する光源装置と；

前記光源装置によって発生された極端紫外光を複数のミラーを用いてマスクに集光する照明光学系と；

前記マスクから反射された極端紫外光を用いて対象物を露光させる投影光学系と；

を具備する露光装置。

19．前記光源装置のレーザ部が、レーザ共振器を有しない増幅段レーザを用いるMOPA (master oscillator power amplifier) 方式に従って構成されている、請求項18記載の露光装置。

20．前記光源装置のレーザ部が、レーザ共振器を有する増幅段レーザを用いるインジェクション・ロック方式 (ILS : injection locking System) に従って構成されている、請求項18記載の露光装置。

## ABSTRACT OF THE DISCLOSURE

エテンデュが小さく、高出力を取り出すことができ、デブリによる損傷の少ない光源装置。この光源装置は、ターゲットにレーザービームを照射することにより極端紫外光を発生する光源装置であって、ターゲットとなる物質を供給するターゲット供給部と、低次の横モードを有する発振段レーザと発振段レーザにより発生した低次の横モードのレーザービームを増幅する増幅段レーザとを含み、増幅されたレーザービームをターゲットに照射することによりプラズマを発生させるレーザ部と、プラズマから放出される極端紫外光を集光して出射する集光光学系とを含む。